

Zagrożenie porażenia prądem przez maszyny elektryczne wyłączane z ruchu

Stefan Gierlotka

Wprowadzenie

Ryzyko porażenia prądem elektrycznym zależne jest od jego natężenia i czasu przepływu. W samoczynnym wyłączaniu zasilania, stanowiącym środek ochrony przeciwporażeniowej, istotny jest czas własny działania urządzeń wyłączających, a więc spodziewany czas ewentualnego rażenia prądem. Prąd elektryczny, przepływając przez organizm człowieka, wywołuje w nim zmiany biologiczne, które nazywamy porażeniem elektrycznym. W niektórych instalacjach zasilających układy napędowe, pomimo wyłączenia napięcia przez zabezpieczenie, występuje nadal, napięcie rażeniowe niebezpieczne dla zdrowia człowieka, indukowane przez stan wybiegu silnika.

Ryzyko porażenia człowieka prądem elektrycznym

Przy rozpatrywaniu aspektów bezpieczeństwa elektrycznego istnieje możliwość określenia spodziewanych skutków wypadku, a więc prognozowanie ryzyka. Za podstawę przyjmując należy fizjologiczne reakcje organizmu człowieka na bodźce elektryczne. Dopuszczalne wartości czasów i prądów rażeniowych zostały opracowane przez komitet IEC oraz wykazane w opracowaniach dotyczących działania prądu elektrycznego na organizm żywy. Przewidywane skutki rażenia ocenia się na podstawie przyjmowanego powszechnie, jako najbardziej miarodajnego, raportu nr 479 Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej [6]. Jako zdarzenie niepożądane przyjmuje się porażenie zagrażające życiu, w wyniku mogącej wystąpić fibrylacji komór serca u porażonego. Inne skutki porażenia powodujące urazy niezagrażające życiu, nawet szokujące dla poszkodowanych, mieszczą się w granicach tolerowanego ryzyka.

Skutki rażenia prądem elektrycznym oceniać można ilościowo, posługując się wykresem zależności wartości spodziewanego prądu rażeniowego od czasu rażenia [6]. Dla prądów przemiennych o częstotliwości od 15 Hz do 100 Hz charakterystyki skutków rażenia przedstawiono na rys. 1. Wykres ten podzielony został na cztery strefy oddzielone krzywymi a, b, c. Krzywa b wyznacza wartość prądu samouwolnienia, to znaczy powyżej którego nie jest możliwe samodzielne uwolnienie się rażonego od napięcia. Zdarzenie zagrażające życiu następuje wówczas, gdy wartości prądu rażeniowego lub czasu rażenia przekraczają wartości graniczne wynikające z krzywej c rozdzielającej strefy AC-3 i AC-4 (rys. 1).

W strefie AC-4, ograniczonej krzywą c, prawdopodobne jest niebezpieczeństwo wystąpienia skutków patofizjologicznych, takich jak: zatrzymanie pracy serca, zatrzymanie oddechu, oparzenia ciała. Ze wzrostem wartości prądu rażeniowego w tej strefie rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia u porażonych zjawiska migotania komór serca. Migotanie komór serca jest

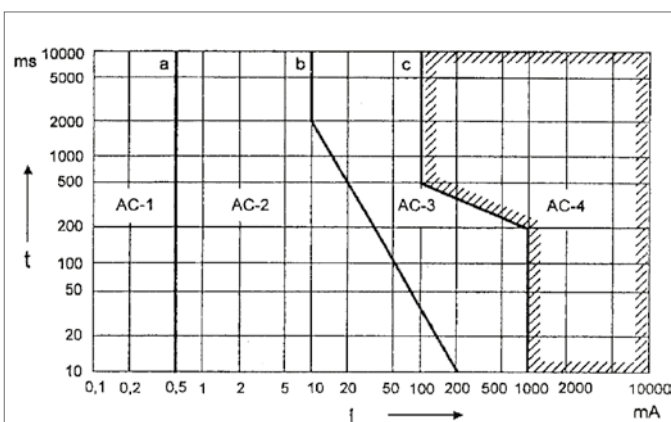
Streszczenie: W artykule opisano zagrożenie porażeniem prądem elektrycznym od maszyn elektrycznych po wyłączeniu napięcia zasilającego, a będących jeszcze w ruchu. Pomimo wyłączenia napięcia nadal występuje w instalacji zasilającej napięcie rażeniowe niebezpieczne dla zdrowia człowieka, indukowane przez stan wybiegu maszyny.

HAZARD OF ELECTRIC SHOCK BY LARGE ELECTRIC MACHINES SWITCHED OFF FROM WORK

Abstract: The article describes the hazard of the electric by large electric machines after them switching off from their supply voltage, but being still in motion. Despite the switch-off from voltage in supply-installation it is still dangerous the shock voltage for health of man, induced by electric machine in stopping period.

uznawane za główną przyczynę śmiertelnych porażen prądem elektrycznym.

Wartość spodziewanego prądu rażeniowego, którą można wyznaczyć ze znajomości napięcia rażeniowego i impedancji ciała człowieka, powinna być ograniczona do wartości bezpiecznej, mieszczącej się w strefie ryzyka AC-3. Na podstawie wartości wyznaczonego prądu rażeniowego określa się z krzywej c graniczny czas rażenia, od którego nie powinien być dłuższy



Rys. 1. Strefy czasowo-prądowe dla prądu przemiennego 50 Hz. AC-1 – brak efektów; AC-2 – nie występują efekty patofizjologiczne; AC-3 – nie zachodzi niebezpieczeństwo migotania komór sercowych, jedynie mogą wystąpić reakcje mięśniowe; AC-4 – możliwość wystąpienia migotania komór sercowych. Krzywa c dotyczy prawdopodobieństwa poniżej 1% populacji, które wzrasta ze wzrostem natężenia prądu i czasu rażenia, [6]

Tabela 1. Maksymalne czasy wyłączenia dla obwodów końcowych AC o prądzie nieprzekraczającym 32 A podane w: Norma PN-HD 60364-4-41: 2009 [8]

Układ sieci	Napięcie względem ziemi			
	50V≤120 V	120V≤230 V	230V≤400 V	>400 V
TN	0,8 s	0,4 s	0,2 s	0,1 s
TT	0,3 s	0,2 s	0,07 s	0,04 s

reklama

czas działania urządzenia ochronnego, zapewniającego samoczynne wyłączenie zasilania. Krzywa c jest granicą tolerowanego ryzyka.

Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym

Od 1991 r. obowiązuje Rozporządzenie Ministra Przemysłu z dnia 08.10.1990 r. [7] w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne w zakresie ochrony przeciwporażeniowej. Rozporządzenie określa napięcie dotykowe nieprzekraczające 50 V za bezpieczne, jeżeli w określonych warunkach środowiskowych impedancja ciała człowieka jest większa od 1000 Ω, lub napięcie 25 V, gdy impedancja ciała człowieka jest mniejsza od 1000 Ω. Dla rażeń prądem stałym wartość napięcia bezpiecznego określono odpowiednio jako 120 V oraz 60 V.

Najbardziej rozpowszechnionym środkiem ochrony przed dotykiem pośrednim, zalecanym we wszystkich instalacjach elektrycznych, jest ochrona przez samoczynne wyłączenie zasilania. Ochrona ta może być stosowana we wszystkich układach sieciowych: TN, TT oraz IT. Urządzenie zabezpieczająco-wyłączające powinno działać w taki sposób, aby w przypadku zwarcia doziemnego między częścią czynną a częścią przewodzącą dostępną napięcie na części przewodzącej dostępnej zostało wyłączone w czasie niepowodującym niebezpiecznych skutków patofizjologicznych dla człowieka.

Norma PN-HD 60364-4-41 [8] wydana w 2009 r., dotycząca ochrony przeciwporażeniowej, określa warunki stosowania samoczynnego wyłączenia zasilania oraz maksymalne czasy wyłączenia zasilania dla obwodów końcowych AC. Czasy wyłączenia zasilania obwodów AC o prądzie nieprzekraczającym 32 A podano w tabeli 1. W pozostałych obwodach układu TN czas wyłączenia nie dłuższy niż 5 s, a w obwodach układu TT czas wyłączenia nieprzekraczający 1 s.

W górniczych sieciach elektroenergetycznych pracujących w układzie IT obowiązuje norma PN-G-42040 [9], która wymaga, aby czas zadziałania centralnego zabezpieczenia upływowego dla napięć od 42 V < U < 500 V wynosił 0,1 s; a dla 500 V < U < 1000 V wynosił 0,07 s. Dopuszczalną wartość napięcia dotykowego w górnictwie podziemnym dla sieci elektrycznych układu IT określa norma PN-6-42041 [10], która w sieciach o napięciu znamionowym do 1 kV zaleca wartość napięcia 25 V.

W technice ochrony przeciwporażeniowej, niezależnie od układu sieci, zostały przyjęte dopuszczalne wartości napięć dotykowych, które zależnie od warunków środowiskowych nie stwarzają zagrożenia porażeniowego. Za największą dopuszczalną długotrwałą wartość napięcia dotykowego AC dla warunków normalnych przyjęto 50 V. Dla warunków środowiskowych o zwiększonym zagrożeniu porażeniowym największą dopuszczalną długotrwałą wartość napięcia dotykowego AC ograniczono do 25 V.

Napięcia wybiegu wytwarzane przez silniki wyłączane z ruchu

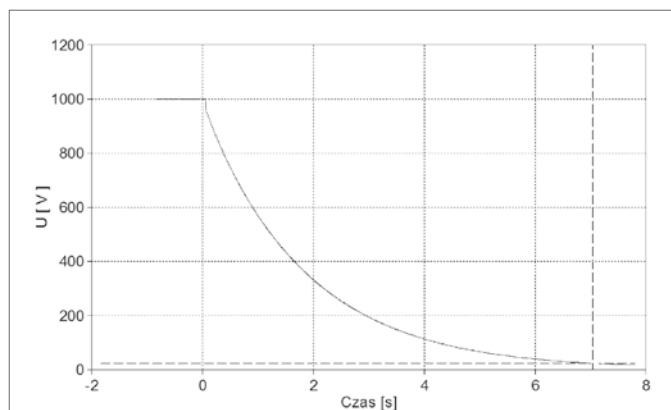
Większość urządzeń eksploatowanych w przemyśle stanowią elektryczne maszyny napędowe sztywno sprzężone z maszynami roboczymi. W każdym przypadku przy wyłączeniu napięcia zasilania wirujących maszyn elektrycznych występują procesy przejściowe zależne od momentu bezwładności wirujących mas. W chwili początkowej zaraz po wyłączeniu zasilania silnika, na skutek bezwładności mechanicznej, jego prędkość obrotowa pozostaje niezmienną. Zmniejszanie prędkości obrotowej wirnika w czasie trwania wybiegu jest spowodowane działaniem mechanicznego momentu obciążenia. Jednocześnie prądy w uzwojeniach silnika maleją do zera. Prądy indukowane w prętach klatki wirnika utrzymują ciągłość strumienia skojarzonego z tym uzwojeniem, podtrzymując pole elektromagnetyczne istniejące przed wyłączeniem zasilania stojana. W silniku występuje pole niestłumione, którego konsekwencją jest pojawienie się napięcia na zaciskach uzwojenia stojana.

W chwili początkowej wytworzone napięcie wybiegu posiada amplitudę i częstotliwość odpowiadającą napięciu sieci zasilającej. Zanika ono szybko przy zmniejszającej się częstotliwości zgodnie z funkcją wykładniczą (pokazaną na rys. 2). Stała czasowa procesu przejściowego zależy od parametrów silnika, jego reaktancji, rezystancji i reaktancji rozproszenia oraz od stanu jego obciążenia po wyłączeniu napięcia zasilającego.

W przemyśle, zwłaszcza wydobywczym, stosuje się wiele napędów dużej mocy zasilanych z sieci 6 kV, których wirniki posiadają duży moment bezwładności. Takimi napędami są przetwornice elektromaszynowe od maszyn wyciągowych pracujących w układzie Leonarda czy też silniki wentylatorów głównych. W niektórych zakładach pracują jeszcze przetwornice w układzie Leonarda z bezwładnościowym kołem Ilgnera. W przypadku przetwornic maszyn wyciągowych pracujących w układzie Leonarda czas wybiegu przekracza 25 min, a napięcie na zaciskach utrzymuje się powyżej ustalonej wartości napięcia bezpiecznego. Podobne zjawiska obserwujemy w silnikach o dużych wirujących masach, napędzających duże wentylatory lub niektóre urządzenia transportowe.

Prognozowanie ryzyka porażenia prądem elektrycznym pochodzącym od napięcia wybiegu

W przypadku bezpośredniego dotyku przez człowieka części fazowej obwodu zasilającego silnik elektryczny stan taki winien zostać zidentyfikowany przez zastosowane zabezpieczenie i wyłączone napięcie zasilania. Stosowane zabezpieczenia przeciwporażeniowe, działające przez samoczynne wyłączenie zasilania, charakteryzują się coraz krótszymi czasami własnymi. Oznacza to, że od zidentyfikowania zagrożenia do wyłączenia zasilania uszkodzonego urządzenia upływający czas powinien być tak krótki, aby u rażonego człowieka nie wystąpiły zmiany elektropatologiczne. Pomimo bardzo szybkiego zadziałania zabezpieczenia i wyłączenia zasilania w wielu przypadkach obwód chroniony zabezpieczeniem nadal pozostaje pod napięciem indukowanym przez wybieg silnika, aż do zatrzymania ruchu napędu. Indukowane napięcie wybiegu, zależnie od rodzaju napędu, może osiągać w początkowych chwilach wartości niebezpieczne dla zdrowia człowieka w przypadku dotyku części czynnych zasilających.



Rys. 2. Przebieg napięcia indukowanego w silniku typu 2SG3450S-4 po wyłączeniu z sieci

Tabela 2. Pomiary czasu wybiegu niektórych badanych silników o napięciu 1 kV

Typ silnika	Moc (kW)	Czas całkowity wybiegu (s)	Czas indukowania napięcia wybiegu $U > 50$ V (s)
2SG4 225S-4	36	2,0	1,2
SP2280L-4	100	7,4	4,3
2SG8420M-4	132	5,8	2,9
3SG4 315M-4	132	5,8	2,7
SG6570M-4A	150	5,5	3,1
SG4B540L4B	200	6,2	4,0
2SGS355L-12/4	250	5,8	3,4
2SG3450S-4	400	7,6	5,3

Na podstawie wykonanych badań w kopalniach stwierdzono, że czas utrzymywania się napięcia wybiegu jest różny i wynosi średnio ok. 600 ms. Po czasie 400 ms napięcie wybiegu w większości badanych silników zmniejszyło się poniżej wartości 50 V. Pomiary czasu trwania i zmiany napięcia wybiegu w badanych silnikach napędzających maszyny górnicze o napięciu do 1 kV wykazały, że na zaciskach badanych silników utrzymywało się napięcie wybiegu o wartości większej od wartości dopuszczalnej dla napięcia dotykowego, w czasie do kilku sekund. Wyznaczony pomiarami czas wybiegu badanych silników, którego napięcie na zaciskach przekraczało 50 V, przedstawiono w tabeli 2.

Podstawą określenia ilościowego ryzyka jest wykres (rys. 1) zależności stref czasowo-prądowych skutków działania prądów rażeniowych na ciało człowieka wg raportu IEC 479 [6]. Za niepożądane i niebezpieczne można uznać skutki wywołane prądem rażeniowym większym od prądu samouwolnienia oznaczonego na wykresie krzywą b. Każdy punkt znajdujący się na wykresie na prawo od krzywej b reprezentuje sytuację, w której ciężkość porażenia jest niepożądana. Im bardziej współrzędne punktu są oddalone od krzywej b, tym większa jest ciężkość porażenia.

W przemyśle istnieją układy zasilania silników, których czas indukowania się napięcia wybiegu o wartości powyżej 50 V może spowodować, że zostanie osiągnięta i przekroczona krzywa graniczna tolerowanego ryzyka rażenia dla strefy c na rys. 1.

Skutki cieplne działania na ciało człowieka prądu rażeniowego (oparzenie prądem) są proporcjonalne do kwadratu natężenia prądu. Punktom położonym na wykresie bardziej na prawo należy przypisać większą wagę zagrożenia.

Wnioski

W przemyśle użytkowanych jest wiele napędów, w których po wyłączeniu zasilania indukuje się napięcie wybiegu aż do chwili zatrzymania silnika. W stanie zagrożenia, gdy zastosowane zabezpieczenie wyłączy zasilanie, obwód chroniony pozostaje nadal pod napięciem wybiegu o wartości mogącej przekraczać wartość przyjętą za bezpieczną. Ewentualne rażenie z określonym prawdopodobieństwem może być uznane za zagrażające zdrowiu i życiu człowieka.

Mimo istnienia takiego ryzyka w większości stosowanych układów napędowych czas wybiegu i indukowane napięcie są tak małe, że nie powstaje takie zagrożenie.

Stwierdzić też należy, że częstotliwość indukowanego napięcia wybiegu maleje z prędkością obrotową wirnika. Jest to czynnik korzystny, gdyż przy obniżaniu częstotliwości napięcia rażeniowego mieszczą się reakcje elektropatologiczne u człowieka.

Literatura

- [1] GAWOR P.: *Wpływ niekorzystnych zmian impedancji ciała człowieka na ryzyko porażenia przemiennym prądem elektrycznym*. XII Krajowa Konferencja Elektryki Górniczej 2008.
- [2] GIERLOTKA S.: *Zagrożenia porażenia prądem powodowane maszynami elektrycznymi wyłączanymi z ruchu*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” nr 68/2004. Seminarium KOMEL „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ustroń 2004.
- [3] GIERLOTKA S.: *Elektropatologia porażen prądem elektrycznym*. Wyd. Śląsk, Katowice 2006.
- [4] GIERLOTKA S.: *Human body impedance in climatically bad conditions*. „Przegląd Elektrotechniczny” nr 11/2008.
- [5] WIATR J., BOCHKOWSKI A., ORZECZOWSKI M.: *Ochrona przeciwporażeniowa oraz dobór przewodów i zabezpieczeń w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia*. MEDIUM, Warszawa 2010.
- [6] IEC – Raport 479 – Part 1 – Draft February 2002: Effects of current on human beings and live stock. ESV – Vienna 2002.
- [7] Rozporządzenie Ministra Przemysłu z dnia 08.10.1990 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne w zakresie ochrony przeciwporażeniowej.
- [8] Norma PN-HD 60364-4-41: 2009. Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41. Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
- [9] Norma PN-G-42040. Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej. Zabezpieczenie upływowo.
- [10] PN-6-42041. Środki ochronne i zabezpieczenia w elektroenergetyce kopalnianej – „System uziemiających przewodów ochronnych” – 1997.